第 40 卷 第 4 期 2022 年 12 月 | 天 文 学 进 展 PROGRESS IN ASTRONOMY | Vol. 40, No. 4 Dec., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.04.08

PPP-B2b 实时精密钟差短期性能评估及更新频度研究

刘金获[1,2]，唐成盼[1]，周善石[1]，胡小工[1]，杨宇飞[3]，杨建华[1,2]，刘宇宸[1,2]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 北京卫星导航中心，北京 100094)

摘要： 研究了 PPP-B2b 精密钟差的短期特征及预报性能，讨论放宽精密钟差改正数播发间隔的可行性。结果表明，BDS-3 卫星星载钟和 GPS BLOCK IIF 星载铷钟具有良好的短期频率稳定度，其钟差 120 s 预报误差在 1 cm 左右，预报误差对精密单点定位收敛速度和收敛后精度几乎无影响。而 GPS BLOCK IIR 卫星星载钟及星载铯钟卫星的短期性能较差，30 s 预报误差已经达到 4 ~ 6 cm，需要较高的解算和更新频度才能保证用户的使用需求。研究发现，对于部分搭载高性能原子钟的卫星，可以在不增加用户信息获取时间的情况下 (该时间会随着播发信息增多而增加)，适当延长钟差改正数的更新周期至 1 min 以内，从而节约下行资源，以播发更多系统产品、大气改正等信息，实现服务性能的提升。

关 键 词： 北斗卫星导航系统；卫星精密钟差；PPP-B2b 服务

中图分类号： P228 **文献标识码：** A

1 引 言

在 GNSS 高精度定位领域，精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 技术可以在没有参考站的情况下为用户提供精确坐标[1]，并广泛应用于海洋测量[2]和地震预警[3]等科学领域。PPP 所使用的精密轨道和钟差产品通常由 IGS 各分析中心提供，其 GPS, GLONASS, Galileo 和北斗二号系统卫星钟差一致性分别为 2 cm, 5 cm, 5 cm 和 10 cm[4]，但发布时间一般存在数天的延迟。随着 GNSS 应用的不断扩展，在诸多领域，用户对于精密产品的实时性提出了更高的需求，如低轨卫星定轨[5]、无人机摄影测量[6]、GNSS 气象[7]等。

收稿日期： 2021-12-23； **修回日期：** 2022-01-30

资助项目： 国家自然科学基金 (12173072)

通讯作者： 刘金获，liujinhuo@shao.ac.cn

北斗三号系统 (BDS-3) 提供的精密单点定位服务 (PPP-B2b) 可以为中国及周边地区提供静态厘米级、动态分米级的双系统实时 PPP 服务[8, 9]，是 BDS-3 提供的特色服务之一。PPP-B2b 通过 BDS-3 中的 GEO 卫星向用户提供实时的 BDS-3 和 GPS 卫星的精密轨道和精密钟差改正数产品。使用 GEO 卫星的 B2b 改正数产品及对应 IGSO 和 MEO 卫星播发的导航电文，用户可以获得精度优于 0.3 ns 的 PPP-B2b 精密钟差产品。

除 PPP-B2b 外，目前还有多家机构对外提供实时和准实时精密产品，部分机构提供的精密钟差产品更新周期和精度情况如表 1 所示。为了保证钟差产品的精度和高频用户的使用需求，包括 PPP-B2b 在内，各实时精密钟差产品均采用了秒级、高频的更新和播发模式。但是，与绝大多数使用网络发布实时精密产品不同，PPP-B2b 精密钟差产品使用卫星端下行信号进行播发，且下行速率有限，仅为 500 bit· s^{-1} (为 QZSS-CLAS 的 25%)。目前，PPP-B2b 仅向用户播发 BDS-3 和 GPS 双系统的精密产品，在卫星掩码、轨道改正数、钟差改正数和码间偏差四类改正信息中，高频更新的钟差改正数占用了 50% 左右的下行资源。在保持钟差改正数更新周期和下行速率不变的情况下，PPP-B2b 无空余资源播发 Galileo 或 GLONASS 系统钟差改正数，从而实现四系统的增强服务。同时，若在现有基础上增加对流层延迟改正等参数的播发，将极大增加用户的数据检索时间 (TTDR)。而四系统增强和大气改正信息的播发可以有效减小用户收敛时间、提高用户定位精度。因此，如何解决高频更新钟差对下行资源的大量占用，是进一步提升 PPP-B2b 服务性能需要解决的重要问题。

表 1　部分对外发布的实时精密产品

产品名称	播发方式	服务系统	轨道更新周期/s	钟差更新周期/s
IGS01	网络	GPS	5	5
IGS02	网络	GPS	60	10
CNS91	网络	GPS/GLO/GAL/BD2	5	5
PPP-B2b	卫星	GPS/BD3	48	6
QZSS-CLAS	卫星	GPS/GLO/GAL	30	5

随着 GPS 现代化进程的推进，以及 BDS-3 等新兴卫星导航系统的建设和落成，卫星原子钟的性能得到极大改善[10]。新型星载原子钟优良的短期性能为 PPP-B2b 精密钟差产品的降频播发提供了可能。本文旨在评估仅使用中国区域观测网解算得到的 PPP-B2b 卫星精密钟差的短期频率稳定度和预报性能，进而讨论采用更加灵活的方式播发 PPP-B2b 精密钟差产品的可行性，并讨论利用降频后剩余播发资源提升 PPP-B2b 服务性能的可能性。

本文首先对 PPP-B2b 精密钟差产品的当前情况进行了简要的介绍，而后对其短期性能进行了简要评估，并对预报钟差的定位性能进行分析。结合以上内容进一步探讨 PPP-B2b 精密钟差产品的更新周期和服务精度。

2 PPP-B2b 服务精密产品计算及播发周期

当前 PPP-B2b 钟差改正数产品解算流程如图 1 所示。定轨模块将得到的卫星精密轨道注入钟差估计模块，钟差估计模块固定精密轨道进行实时精密钟差滤波解算，改正数计算模块则在精密产品的基础上进行合理性剔除和修正并计算最终改正数产品。

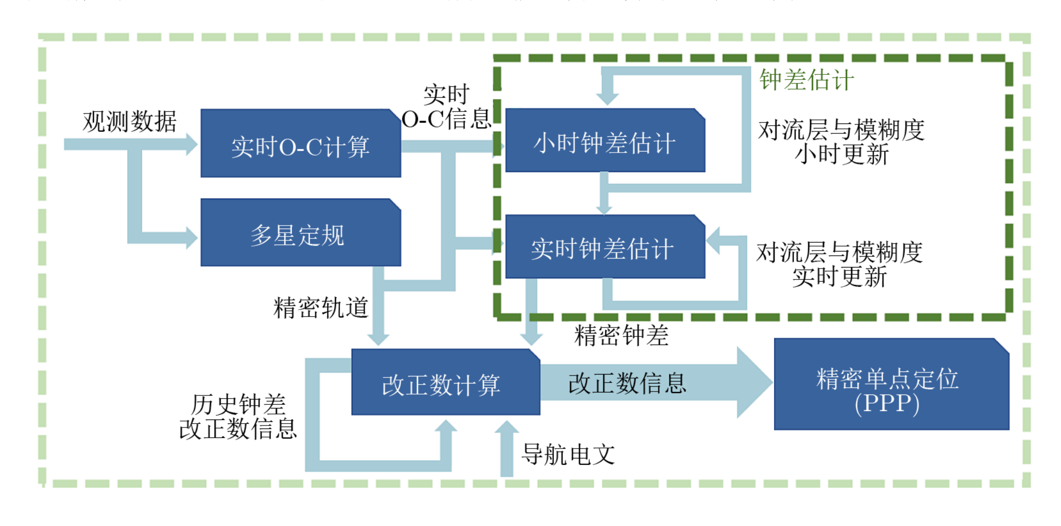


图 1　PPP-B2b 钟差解算流程

由于客观条件限制，目前钟差解算模块仅使用中国境内区域网观测数据，卫星钟差仅在入境时段可以进行解算。PPP-B2b 目前采用小时滤波估计与实时滤波估计相结合的模式来进行实时钟差解算。小时滤波估计每小时将解算得到的模糊度和对流层信息注入到实时滤波估计进程中，保证在卫星不断出入境的情况下，实时滤波估计进程可以稳定收敛，不易发生解算失败和服务中断。

表 2　一个播发周期内 PPP-B2b 电文下行内容

时间/s	播发内容
1	掩码
2 ～ 4	钟差改正数
5 ～ 7	DCB 参数
8 ～ 10	钟差改正数
11 ～ 12	DCB 参数
13	轨道改正数或 DCB 参数
14 ～ 16	钟差改正数
17 ～ 19	轨道改正数
20 ～ 22	钟差改正数
23 ～ 24	轨道改正数

PPP-B2b 以每秒 500 bit 的下行速率向用户播发四种类型的改正数产品。其中，Type1 类型提供了服务卫星的列表，更新周期 48 s；Type2 和 Type3 类型向用户播发所有境内服务卫星的轨道改正数和各频点 DCB 参数，更新周期 48 s。而 Type4 类型则向用户下发掩码列表中所有卫星的钟差改正数，境外卫星和无效卫星使用 −26 占位，更新周期 6 s。PPP-B2b 的 TTDR 约为 24 s，即用户开机后需要 24 s 方可收齐所有卫星改正信息，一般 24 s 内其电文安排如表 2 所示：

(1) 在每一个 6 s 周期内，钟差改正数需要占用其中 3 个子帧 (3 s) 进行传输，空余资源用于其他数据类型的传输。因此，在维持播

发周期和模式不变的情况下，当前的下行资源无法支持更多系统卫星的钟差改正数播发。

(2) 其他数据类型在一个 48 s 更新周期中，约需 12 个子帧 (与境内有效卫星数量有关) 完成数据传输，大约需要四个 6 s 周期。若在现有基础上增加对流层延迟改正等参数的播发，将会造成 TTDR 的直接增加。

3　PPP-B2b 卫星钟差短期性能分析

考虑到卫星精密钟差短期性能与原子钟型号有关，且可能受到轨道误差的影响，因此可以将 BDS-3 卫星和 GPS 卫星各分为四类，对于不同类型的卫星分别进行讨论。各类卫星的轨道类型及原子钟状态如表 3 所示。

表 3　BDS-3 和 GPS 各类卫星状态

系统	卫星状态/星钟类型	PRN
BDS-3	CAS, MEO, PHM	C25, C30, C26, C34, C27, C35, C28, C43, C29, C44
	CAST, MEO, PHM	C45, C46
	CAST, IGSO, PHM	C38, C40, C39
	CAST, MEO, RAFS	C19, C32, C20, C33, C21, C36, C22, C37, C23, C41, C24, C42
GPS	Block IIF, Rb	G01, G27, G03, G30, G06, G32, G09, G10, G25, G26
	Block III, Rb	G04, G14, G18
	Block IIR, Rb	G02, G20, G11, G21, G13, G22, G16, G23, G19, G28
	Block IIR-M, Rb	G05, G17, G07, G29, G12, G31, G15
	Block IIF, Cs	G08, G24

3.1　PPP-B2b 钟差短期频率稳定度分析

对于卫星钟差，频率稳定度本身并不反映其正确与否，仅反映其频率的一致性[11]，阿伦偏差[12]和哈达玛偏差[13] 分别顾及了一次和二次项影响后的频率稳定度分析方法。由于本文仅对短期稳定性进行分析，钟漂项 (a2) 的影响可以忽略不计，因此均使用阿伦偏差来评价各卫星钟差的稳定度，为后文的预报性能分析提供参考依据。

图 2 给出 BDS-3 各类卫星其 PPP-B2b 精密钟差的阿伦偏差。对于不同类型的卫星，其短期稳定度不存在明显差异。十秒稳定度在 10^{-12} 左右，百秒稳定度则在 $2\times10^{-13}\sim3\times10^{-13}$ 之间，千秒稳在 1×10^{-13} 左右。阿伦偏差曲线斜率由十秒时的 $-0.7\sim-0.8$ 逐渐上升到 $-0.5\sim-0.6$，说明钟差中的噪声成分由相位白噪声主导逐渐变为频率白噪声主导[14]。一般来说，原子钟地面测量中起主导作用的是频率白噪声和频率随机游走噪声[15]，相位白噪声的主要来源则应当来自于卫星观测噪声平差后在卫星钟差中的残余。

图 3 给出 GPS 不同种类卫星其 PPP-B2b 卫星钟差的阿伦偏差。对于不同种类卫星，其短期稳定度差异明显。Block IIF 和 Block III 铷钟卫星的短期稳定度明显优于其他类型卫星，十秒稳定度在 3×10^{-12} 左右，百秒稳定度在 $3\times10^{-13}\sim4\times10^{-13}$ 之间，千秒稳为 $1\times10^{-12}\sim2\times10^{-12}$，略逊于 BDS-3 卫星。Block IIF 铯钟卫星稳定度最差，十秒稳定度

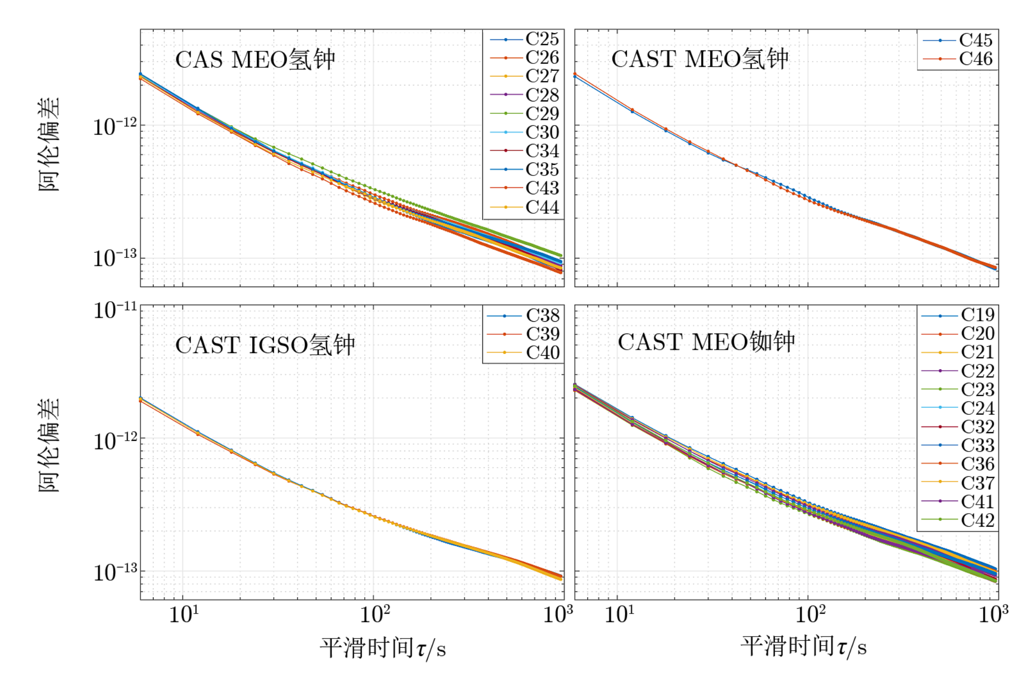


图 2 基于 PPP-B2b 产品的 BDS-3 卫星钟差稳定度

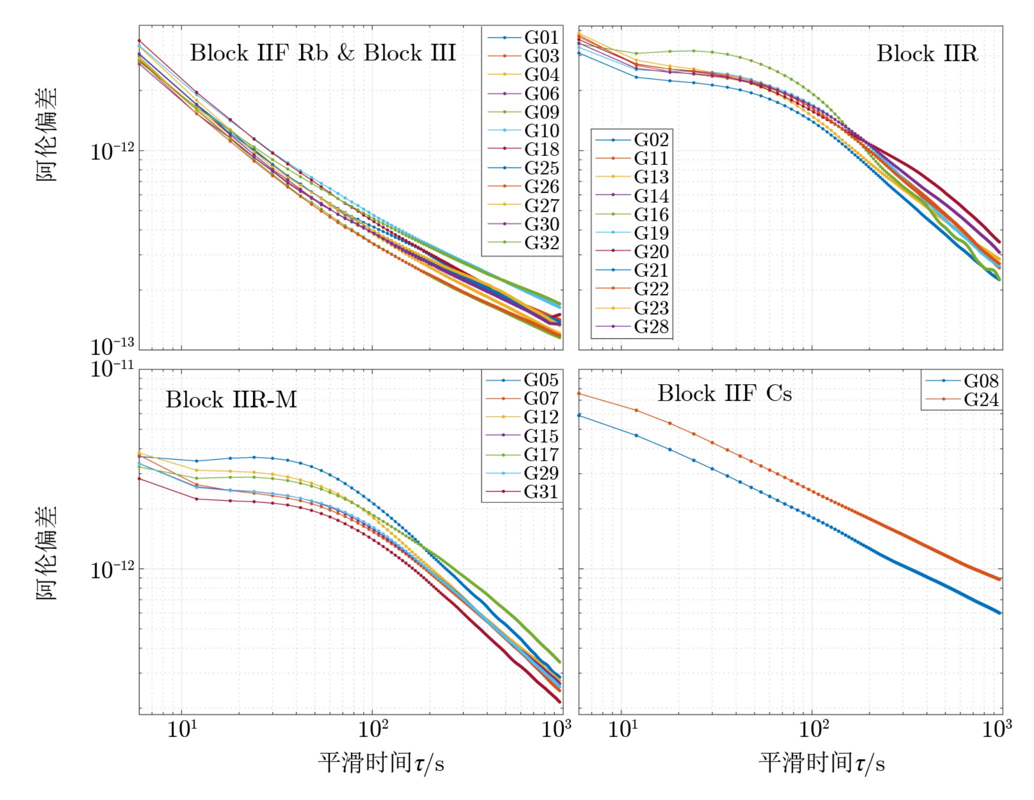


图 3 基于 PPP-B2b 产品的 GPS 卫星钟差稳定度

在 7×10^{-12} 左右，百秒稳定度在 1×10^{-12} 左右，千秒稳则为 $6\times10^{-13}\sim9\times10^{-13}$。Block IIR 和 Block IIR-M 卫星十秒稳定度与 IIF 相近，在 3×10^{-12} 左右。但是，由于其十秒到百秒区间中，阿伦偏差曲线存在非线性变化，百秒稳定度为 $1\times10^{-12}\sim2\times10^{-12}$，千秒稳定度为 $2\times10^{-13}\sim4\times10^{-13}$ 之间，差于 BLOCK IIF 和 BDS-3 卫星。

值得注意的是，Block IIR 卫星和 Block IIR-M 卫星的阿伦偏差在十秒到百秒间存在明显的非线性变化。Li 等人[16]利用高频观测，研究了 GPS 卫星钟差的极短期稳定度，其结果也表现出类似的非线性变化，但对于该变化未进行进一步分析。目前该现象的产生原因尚不明确，但是可以预见其对卫星钟差对应时长的预报性能将产生负面影响。

综上，根据卫星的短期稳定度，可以将其大致分为两类：第一类卫星包括 BDS-3 所有卫星和 GPS 新型号铷钟卫星 (包括 Block IIF 及 Block III)，具有良好的短期稳定度；第二类卫星则是 GPS 旧型号卫星和 Block IIF 铯钟卫星。两类卫星的短期稳定度存在明显差异，第一类卫星明显优于第二类。

3.2 PPP-B2b 卫星钟差预报性能分析

卫星钟差根据其自身性质，可以使用一次多项式模型、二次多项式模型、灰色模型等预报模型进行预报[17]。由于仅对短期性能分析，本节选择简单的一次多项式模型对钟差序列进行短期预报，拟合时长为 2 min，预报时长为 0 ∼ 2 min。通过对比预报钟差与实际钟差的差异，对钟差的预报性能进行简要分析。

图 4 给出了 BDS-3 不同类型卫星钟差的预报均方根误差 (RMS)。由图可知，各卫星预报误差变化趋势接近线性变化，且预报精度随时间衰减基本一致。除个别卫星外，1 min 预报钟差的 RMS 优于 6 mm (0.02 ns)，2 min 预报钟差的 RMS 优于 1 cm (0.033 ns)。

图 5 给出了 GPS 不同类型卫星钟差的预报误差。由图可知，不同类型的 GPS 卫星钟差预报精度不同。IIF 铷钟卫星和 IIIA 卫星的钟差预报精度不存在明显差异，在 GPS 卫星中最高，且随时间线性衰减。1 min 预报钟差的 RMS 为 5 ∼ 7 mm，2 min 预报钟差的 RMS 优于 11 mm，短期预报精度略差于 BDS-3 卫星。对于 Block IIR 和 IIR-M 型号的卫星，除 PRN05 卫星外，其他卫星 1 min 预报钟差的 RMS 为 4 ∼ 6 cm，2 min 预报钟差的 RMS 在 6 ∼ 9 cm 之间，与新型号的 GPS 卫星和 BDS-3 卫星预报精度相差一个数量级。Block IIF 铯钟卫星预报精度最差，PRN08 和 PRN24 卫星 1 min 预报钟差 RMS 分别为 6 cm 和 8 cm，2 min 预报钟差 RMS 达到 8 cm 和 12 cm。

表 4 给出了各型号卫星的 30 s, 60 s 和 120 s 预报误差。总体来看，新型号的 GPS 卫星与 BDS-3 卫星钟差预报性能基本一致，2 min 预报的 RMS 约为 1 cm。由于使用一次多项式模型进行预报，因此对于这两类卫星，只需在播发信息中包括卫星钟差零阶项和一阶项信息，单组钟差的时效性至少可以达到 120 s 以上。Block IIR 和 IIR-M 以及 Block IIF 铯钟卫星预报能力较差，30 s 预报误差已经达到 4 ∼ 6 cm，需要较高的解算和更新频率才能保证用户使用精度需求，制约了精密产品的播发频度。

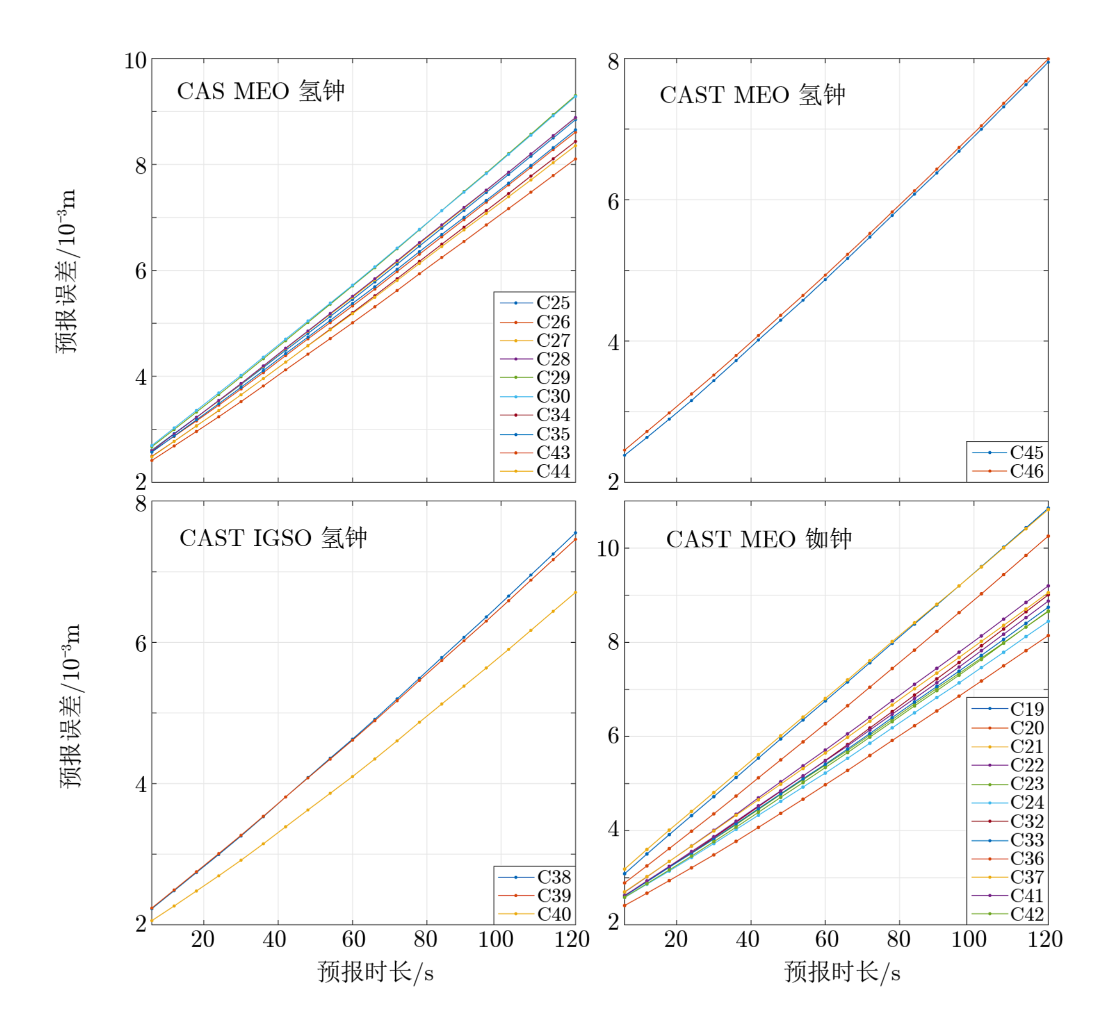


图 4 PPP-B2b BDS-3 卫星钟差预报误差

表 4 各类型卫星钟差预报误差

m

产品名称	30 s 预报误差		60 s 预报误差		120 s 预报误差	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
Block IIR	0.029	0.038	0.040	0.056	0.059	0.085
Block IIF Rb	0.004	0.005	0.006	0.007	0.010	0.011
Block IIR-M	0.035	0.044	0.051	0.064	0.079	0.098
Block IIF Cs	0.046	0.053	0.067	0.077	0.107	0.123
BDS-3	0.004	0.005	0.005	0.007	0.009	0.011

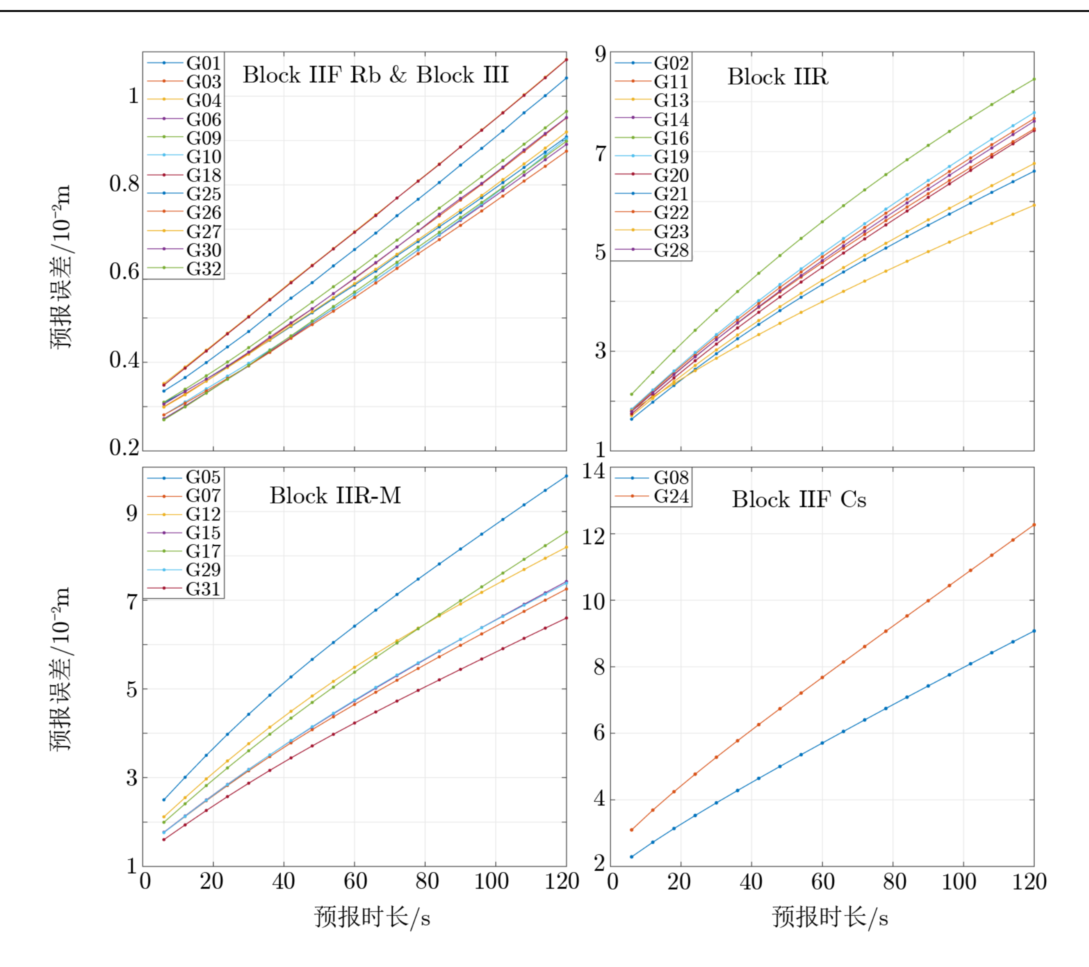


图 5　PPP-B2b GPS 卫星钟差预报误差

4　PPP-B2b 预报钟差定位性能分析

在 PPP 中，钟差误差可能在星座构型等因素的影响下，对定位结果造成不同影响。因此，为了讨论钟差预报误差对定位性能的影响，分别使用 GFZ 产品、PPP-B2b 产品和 PPP-B2b 120 s 预报产品进行了动态的 PPP 对比实验。为了降低轨道和钟差的插值误差对定位的影响，PPP 开始时间为每天的 1 时，结束于每天 23 时。定位使用的各项参数如表 5 所示。

本章将从收敛时间及收敛后 95% 误差限两个方面对动态 PPP 的定位结果进行讨论。同时，由于 BDS-3 所有卫星均具有良好的短期预报能力，因此本章中，分别对 BDS-3 单系统和双系统进行定位试验，以对比在仅使用新型号卫星和新旧型号混用的两种不同情况下，钟差的 120 s 预报误差对定位性能的影响。

表 5 PPP 策略

类目	定位策略
观测数据	iGMAS 中国境内测站观测数据
日期	2020 年 8 月 1 日至 8 月 7 日
使用系统	BDS-3，GPS
使用频点	GPS:L1/L2 PC+LC；BDS-3:B1I/B3I PC+LC
截止高度角	15°
采样间隔	60 s
卫星轨道	分别使用 B2b 轨道产品和 GFZ 轨道产品
观测权重	PC : LC = 1 : 100
气象模型	GPT2.1W
对流层模型	SAAS
投影模型	VMF1
系统时差	白噪声估计
对流层估计模式	随机游走，过程噪声每小时 1 cm
估计方法	卡尔曼滤波
定位模式	静态/动态

4.1 BDS-3 单系统动态定位结果

BDS-3 所有卫星均具有良好的短期预报能力，可以使用 BDS-3 单系统动态定位结果来讨论在仅使用新型号卫星的情况下，新型号卫星钟差的预报误差对定位性能的影响。表 6 给出不同产品的 BDS-3 单系统动态 PPP 收敛后精度。BDS-3 卫星的 120 s 钟差预报误差几乎不会对收敛后定位精度造成影响。表 7 则给出了 BDS-3 单系统动态定位的收敛时间，收敛条件来自北斗导航应用服务性能体系[9]。若连续 5 min 水平方向定位误差小于 30 cm，高程方向定位误差小于 60 cm，则认为定位收敛。由此可知，钟差的预报误差对动态 PPP 收敛时间影响小于 1 min，对收敛后定位精度几乎无影响；这与第 3 章中，BDS-3 卫星钟差 2 min 预报误差可以忽略的结论是一致的。

表 6 BDS-3 单系统动态定位收敛后 95% 误差限统计 m

测站	水平		高程	
	预报产品	B2b 产品	预报产品	B2b 产品
STA01	0.127	0.126	0.172	0.170
STA02	0.218	0.219	0.226	0.216
STA03	0.080	0.086	0.203	0.228
STA04	0.117	0.116	0.157	0.154
STA05	0.116	0.113	0.185	0.177
STA06	0.158	0.158	0.228	0.233
STA07	0.106	0.106	0.231	0.228
均值	0.132	0.132	0.200	0.201

表 7　BDS-3 单系统动态定位收敛时间统计　min

测站	预报产品	B2b 产品
STA01	28.1	26.9
STA02	26.0	26.3
STA03	15.4	14.7
STA04	33.7	33.6
STA05	12.0	11.1
STA06	14.3	13.4
STA07	36.6	36.4
均值	23.8	23.2

4.2　双系统动态定位结果

表 8 给出了不同产品动态定位的收敛时间统计，定位收敛的判断条件连续 5 min 为水平方向误差小于 20 cm、高程方向误差小于 40 cm。其中，使用 GFZ 产品和 B2b 产品的定位收敛时间基本一致，平均收敛时间为 12 min。对比预报产品和 B2b 产品的定位收敛时间，平均收敛时间由 12 min 延长至 21 min。

表 8　BDS-3 和 GPS 双系统动态定位收敛时间统计　min

测站	预报产品	B2b 产品	GFZ 产品
STA01	25.6	17.9	8.7
STA02	18.3	8.7	22.7
STA03	26.6	13.7	10.0
STA04	24.9	17.7	9.0
STA05	13.4	10.4	11.0
STA06	18.4	6.9	11.3
STA07	22.7	6.9	13.0
均值	21.3	11.7	12.2

表 9 给出不同产品的双系统动态 PPP 收敛后精度。GFZ 提供的事后产品定位精度最高，定位收敛后水平和高程方向 95% 定位误差多站多天统计结果为 5 cm 和 10 cm。使用 B2b 产品，定位收敛后 95% 定位误差水平方向为 6 cm，高程方向为 11 cm，与 GFZ 产品相近。使用预报钟差，水平和高程方向 95% 误差则为 9 cm 和 15 cm，收敛后精度下降明显。

图 6 给出了 STA01 接收机 8 月 2 日观测数据分别使用 120 s 预报钟差和 B2b 钟差的双系统动态定位结果。对比两组定位结果可知，如上文所述，钟差的 120 s 预报误差会造成动态定位收敛速度变慢，定位精度下降，但是不会造成动态 PPP 发散。与 BDS-3 单系统动态定位结果进行对比后，可以认为，新型号卫星的高精度预报钟差保证了动态 PPP 不会出现发散现象，GPS 旧型号卫星和 Block IIF 铯钟卫星较大预报误差造成了定位结果的弥散，也是造成双系统定位精度损失和收敛时间增加的主要原因。

表 9 BDS-3 和 GPS 双系统动态定位收敛后 95% 误差统计 m

测站	水平方向			高程方向		
	预报产品	B2b 产品	GFZ 产品	预报产品	B2b 产品	GFZ 产品
STA01	0.083	0.063	0.066	0.173	0.114	0.106
STA02	0.085	0.059	0.055	0.145	0.108	0.099
STA03	0.088	0.082	0.042	0.179	0.171	0.143
STA04	0.096	0.071	0.046	0.128	0.082	0.076
STA05	0.080	0.055	0.046	0.126	0.106	0.120
STA06	0.101	0.073	0.067	0.161	0.130	0.118
STA07	0.078	0.057	0.046	0.150	0.117	0.087
均值	0.087	0.066	0.052	0.152	0.118	0.107

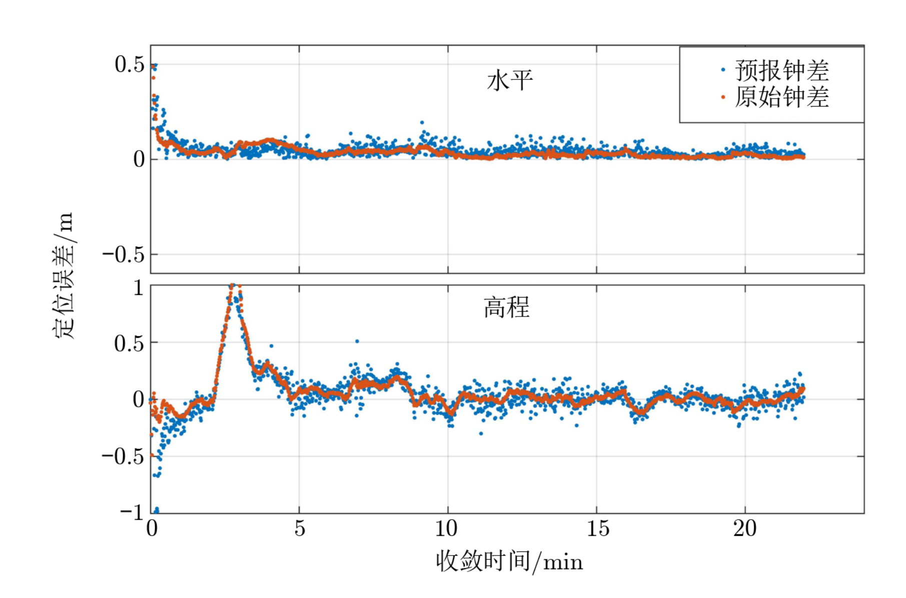


图 6 原始钟差产品与 120 s 预报钟差产品定位结果对比

5 钟差更新周期讨论

前文简要介绍了 PPP-B2b 下行电文的现状，并对基于区域网解算的 PPP-B2b 实时钟差的短期性能进行了探讨。根据结果，我们认为，由于新旧型号卫星原子钟性能上的巨大差距，PPP-B2b 在当前下行速率有限的情况下可以选择更加灵活的电文播发模式。

第 3 章以及第 4 章已经得到结论，对于新型号卫星，可以保证其卫星钟差 2 min 的一次多项式预报误差在 1 cm 左右。因此，若同时向用户播发其 a0 和 a1 项的改正信息，这些卫星单组改正数的有效时间至少达到 1 min 以上，可以将这些新型号卫星的更新周期放宽至 1 min 以内且不大于当前 TTDR 的任意时长。并且，即使用户连续 2 min 没有

收到该卫星的改正数，使用包含 a1 项的改正信息仍可得到预报误差 1 cm 左右的精密钟差产品。而对于旧型号卫星，其钟差改正数更新周期仍然保持当前 6 s 的更新间隔，仅播发 a0 值。使用新的策略，可以在保证用户 TTDR 不变的情况下，将 24 s 内 PPP-B2b 更新电文安排如表 10 所示。

在新的播发模式下，每个子帧可以包含 12 颗新型号卫星的钟差或 23 颗旧型号卫星钟差，而新旧型号则可以在信息类型 1 中进行区分。在保证 TTDR 时间不变的情况下，每 24 s 可以增加 3 至 4 个子帧的空余位置。这些位置可以用于新增导航系统支持或播发大气等增强信息。随着搭载高性能原子钟的卫星占比越来越高，新的播发模式将体现出越来越大的优势。

表 10 新播发模式下 24 s PPP-B2b 电文下行内容

时间/s	播发内容
1	掩码
2	旧卫星钟差
3 ~ 6	新卫星钟差
7	DCB 参数
8	钟差改正数
10 ~ 13	DCB 参数
14	旧卫星钟差
15	轨道改正数
16 ~ 19	轨道改正数
20	旧卫星钟差
21	轨道改正数或空余
22 ~ 24	空余

6 结 论

本文介绍 PPP-B2b 精密钟差产品，对其短期性能进行讨论，并结合其短期性能对当前 B2b 电文的更新模式进行了进一步探讨。首先对其稳定性和预报能力进行了简要评估，并对预报钟差的定位性能进行分析，然后进一步探讨了精密钟差产品的时效性问题和播发频率问题。

根据钟差的短期稳定性和预报能力可以大致将 PPP-B2b 服务卫星分为两类。第一类为 BDS-3 卫星和 GPS 新型号铷钟卫星 (Block IIF 和 Block III)，其卫星钟差稳定度最高，预报性能最优，短期稳定度明显优于其他类型卫星，120 s 预报误差在 1 cm 左右；第二类为 GPS 旧型号卫星 (Block IIR 和 IIR-M) 和 Block IIF 铯钟卫星，该类卫星 120 s 预报误差大于 10 cm。

而后，使用 120 s 预报 PPP-B2b 精密钟差进行精密单点实验。对于 BDS-3 单系统动态定位，钟差的预报误差几乎对定位无影响；而对于双系统动态定位，预报误差会造成收敛后 95% 定位误差增大，同时使收敛时间增加。因此，可以认为，GPS 旧型号卫星和 Block IIF 铯钟卫星的预报误差是造成双系统定位精度损失和收敛时间增加的主要原因。

考虑到新旧型号卫星原子钟性能上的巨大差距，PPP-B2b 在当前下行速率有限的情况下完全可以选择更加灵活的电文播发模式。对于第一类卫星 (BDS-3, Block IIF 和 Block III)，只需在播发信息中包括卫星钟差 a0 项和 a1 项信息，单组钟差的时效性至少可以达到 120 s 以上。若将该类卫星钟差播发频率降低至 24 s，可保证在 TTDR 和定位精度不变的情况下，每 24 s 节省 3 ~ 4 s 的下行资源。第二类卫星的预报能力较差，30 s 预报误差已经达到 4 ~ 6 cm，单组钟差长时间的预报会对定位精度造成一定的影响。因此，需要较高的解

算和更新频率才能保证用户的使用需求，应当维持当前播发周期不变。随着 GPS 和北斗在内的 GNSS 系统不断升级，可以预见星载卫星钟的短期稳定度性能会得到进一步提升。而随着高性能原子钟的占比越来越高，新的播发模式可以体现出越来越大的优势。

参考文献：

[1] Kouba J, Héroux P. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12

[2] Liu R, Guo B, Zhang A, et al. Ocean Engineering, 2020, 197: 6826

[3] Geng J, Bock Y, Melgar D, et al. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2013, 14(7): 2124

[4] Steigenberger P, Montenbruck O. Engineering, 2020, 6(8): 898

[5] Bock H, Hugentobler U, Beutler G. First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies. Berlin: Springer, 2003: 65

[6] Grayson B, Penna N T, Mills J P, et al. The Photogrammetric Record, 2018, 33(164): 427

[7] Dousa J, Vaclavovic P. Advances in Space Research, 2014, 53(9): 1347

[8] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document, Precise Point Positioning Service Signal PPP-B2b (Version 3.0). 2021. http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/

[9] China Satellite Navigation Office. The Application Service Architecture of BeiDou Navigation Satellite System. 2020. http://en.beidou.gov.cn/ SYSTEMS/ICD/

[10] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), USA: IEEE, 2020: 407

[11] 李孝辉. 时间频率信号的精密测量. 北京: 科学出版社, 2010: 103

[12] Barnes J A, Allan D W. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2): 176

[13] Baugh R A. Frequency Modulation Analysis with the Hadamard Variance. 25th Annual Symposium on Frequency Control. Atlantic City, NJ, USA: IEEE Xplore, 1971: 222

[14] 伍贻威. GNSS时间基准关键技术研究. 测绘学报, 2017, 46(4): 533

[15] Galleani L, Tavella P. Control Systems IEEE, 2010, 30(2): 44

[16] Li M, Zhang S, Hu Y, et al. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(10): 1490

[17] Zheng Z Y, Chen Y Q, Lu X S. Acta Astronomica Sinica, 2008, 49(3): 306

Research on Short-term Performance and Update Frequency of PPP-B2b Real-time Precise Clock Difference

LIU Jin-huo[1,2], TANG Cheng-pan[1], ZHOU Shan-shi[1], HU Xiao-gong[2], YANG Yu-fei[3], YANG Jian-hua[1,2], LIU Yu-chen[1,2]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: With precise point position technology, a user can achieve precise coordinates

without reference stations. The real-time precise orbit and clock offset products are the premise and guarantee of the real-time PPP application. In order to meet the real-time and precision requirements of users, the precise clock offset of PPP-B2b updates in seconds, which is the same as others institutions. However, according to the statistics of PPP-B2b messages, the high-frequency updating satellite clock offset occupies a large amount of downlink resources of PPP-B2b, which delays the first positioning time of users and limits the further performance improvement of PPP-B2b. This paper evaluates the short-term variation characteristics and prediction error of PPP-B2b precision clock offset, and discusses the possibility to reduce clock offset update frequency. Thanks for their new type of atomic clock, the clock offset of BDS-3 satellites and GPS satellites with RAFS show high short-term frequency stability, and the 120 s prediction error of which is only about 1 cm and has little influence on the convergence speed and precision of PPP. However, the clock offset of the GPS old type satellites and Block IIF satellites with Cs clock have low short-term performance, of which the 30 s prediction error has reached 4 to 6 cm, which need high-frequency updating to meet the users' accuracy demand. Therefore, we suggest that the clock offset broadcast strategy of high-performance satellites could be transformed into a more flexible style to save downlink resource. On the premise that TTDR will not be extended, the updating period can be prolonged within 1 minutes. The saved downlink resource of PPP-B2b can be used to broadcast more augmentation information such as precise products of others system or atmospheric correction so as to improve service performance further.

Key words: Beidou-3 Navigation Satellite System；precise clock offset；PPP-B2b service